



⑮ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 196 00 002 A 1**

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**G 01 B 21/04**  
G 06 T 7/60  
G 07 C 3/14

DE 196 00 002 A 1

②① Aktenzeichen: 196 00 002.5  
②② Anmeldetag: 1. 1. 96  
④③ Offenlegungstag: 11. 7. 96

③⑩ Innere Priorität: ③② ③③ ③①  
05.01.95 DE 195001877

⑦① Anmelder:  
Santic, Blaz, Dr. (Univ.Zagreb), 86159 Augsburg, DE

⑦② Erfinder:  
gleich Anmelder

⑤④ Integrales Verfahren für on-line Geometrieprüfung von Werkstücken aus mehreren Formflächen

⑤⑦ Herkömmliche Auswerteverfahren für Koordinatenmessungen beziehen sich nur auf einzelne Standard-Formelemente. Bislang war bis auf wenige Ausnahmen eine brauchbare Aussage über die integrale Werkstücksgeometrie nicht möglich. Die Verknüpfung der partiell geprüften Werkstücksteile führt somit dazu, daß die Aussage über die Prüfungsqualität schlechter als die Fertigung selber ist, d. h. Werkstücke, die innerhalb der Fertigungstoleranzen liegen, werden u. U. fälschlicherweise als Ausschuß deklariert und die Fertigungstoleranzen werden unnötig zu eng gehalten. Dagegen wird mit der integralen Auswertung eine günstigere MMC-Bedingung gemäß DIN-ISO 2692 ermittelt. Das Finden einer gemeinsamen Bezugsachse, z. B. gemäß DIN-ISO 5459 von zwei und mehreren Zylinderflächen oder eines prismatischen Teiles, wird elegant und mathematisch korrekt gelöst.

Die eindeutigen und wiederholbaren Ergebnisse der Integralauswertung beinhalten alle tolerierten Verknüpfungen und Gewichtungen aller gemessenen Flächen eines Werkstücks.

Die Parameter aller Formelemente des Werkstücks oder eines Werkstückteiles werden direkt aus den Meßpunkten ohne Startwerte automatisch generiert und diese in dreidimensionalem Raum ohne ständige Koordinatentransformation so lange iteriert, bis die gewünschte Genauigkeit erreicht worden ist.

Das Verfahren in Form eines Programmpakets ist für die Bedienung weitgehend flexibel. Es genügt z. B. nur die Vorlage der Meßpunkte und das Anklicken des Menüs, ohne jegliche ...

DE 196 00 002 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 05. 96 602 028/310

8/26

Die vorliegende Patentanmeldung bezieht sich auf das integrale (ganzheitliche) Geometrie-Auswerteverfahren von Werkstücken (oder Werkstücksteilen) bestehend aus mehreren Formflächen mit freier Orientation im 3D-Raum, wobei die Auswertung aus den Meßpunkten, dargestellt im karthesischen, sphärischen, zylindrischen oder irgendeinem anderen Koordinatensystem, bei viel größerer Punktezahl als der Anzahl der gesuchten Parameter erfolgt. Die Werkstücke sind dabei gekennzeichnet durch Kombinationen und tolerierten Verknüpfungen innerhalb der Standard- oder Grundformelemente wie Zylinder, Ebene, Kugel, Kegel oder Torus. Das Verfahren ist vorwiegend für die Anwendung in der Koordinatenmeßtechnik vorgesehen.

Die herkömmlichen Verfahren für die Geometrieprüfung für Koordinaten-Messungen beziehen sich nur auf einzelne Standard-Formelemente. Die Meßauswertung eines reellen Körpers, der fast immer aus mehreren Formelementen besteht, erfolgt demgemäß jeweils nur partiell. Die Verknüpfung der partiell geprüften Werkstückteile führt oft dazu, daß die Aussage über die Prüfungsqualität schlechter als die Fertigung selber ist, d. h. Werkstücke, die innerhalb der Fertigungstoleranzen liegen, werden u. U. fälschlicherweise als Ausschuß deklariert und die Fertigungstoleranzen werden unnötig zu eng gehalten!

Diese Tatsache hat zweierlei Gründe:

Zum ersten sind die vorgeschriebenen Prüfungsbedingungen betreffend Maximum- & Minimum-Material-Principle (MMC) in ISO-Norm 2692 [1] (sowie in den anderen in diesem Zusammenhang stehenden ISO-Normen) nicht korrekt. Unter der Anwendung des sogenannten normgerechten Tschebyscheff-Prüfungsverfahrens ist dort das Prüfungskriterium auf einen partikularen Fall der Messung bezogen, nämlich auf den Fall, daß sich ein Meßpunkt in der von der Achse und Bezugsebene am weitesten entfernten Lage befindet. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Konstellation ist äußerst selten, so daß die Qualität des Werkstücks von der Normung her unnötig verschlechtert wird.

Zum zweiten ist die von den Herstellern der Koordinatenmeßgeräte bereitgestellte Software mit ihrer partiellen Prüfungslogik selbst nicht korrekt, unabhängig von der Anwendung der Methode nach least-square (Gauß), Tschebyscheff, Pferchelement, Hüllelement, usw. Diese Verfahren reichen bei Anwendung in einer komplexen Werkstücksgeometrie nicht aus, um die Verknüpfungsqualität und Korrelationen von verschiedenen Elementen der komplexen Geometrie festzustellen.

Die Thematik der integralen Auswertung wird zwar in einigen Arbeiten schon behandelt oder auch nur erwähnt, aber ihre Zielsetzung und Anwendung ist dabei sehr eingeschränkt.

Die Möglichkeit der Senkung der Fertigungskosten des Werkstücks oder die Ermittlung seiner wahren Qualität wurde bislang offensichtlich nicht erkannt.

Umso weniger ist dabei an eine Verknüpfung oder Ausschöpfung der Toleranzen und u. U. an die Wichtigkeitsgewichtung der einzelnen Formflächen gedacht worden.

Dies zeigen folgende Beispiele:

Manche Softwares für die Koordinaten-Meßmaschinen beinhalten im Menü ein bis zwei einfache ganzheitliche Auswertungen, z. B. ein Langloch oder einen Zylinder mit einer Ebene. Der Zweck solcher Software-Bausteine ist die einfache Erweiterung des Menüs.

In einem weiteren Fall sind beschränkte Laborversuche für die ganzheitliche Betrachtung eines Werkstücks für die Gesenkschmiede-Industrie durchgeführt worden. Dabei handelte sich lediglich um eine ganzheitliche Einpassung der Sollgeometrie eines einzigen Werkstücks in die Meßpunkte. Eine solche Methode der ganzheitlichen Einpassung wurde zum Zweck des Beschleunigens und Automatisierens der Auswertung der Gesenkschmiedestücke entwickelt.

Weiterhin ist noch ein Verfahren zur Auswertung eines prismatischen Werkstücks bekannt, daß auf der Mittelung (Mittelwertbildung) der jeweils gegenübergestellten Flächen, in deren Schnittgerade sich eine Achse befinden soll, beruht. Die Geometrie eines nach dem

Verfahren ausgewerteten Werkstücks ist durch eine sogenannte Gestaltmatrix dargestellt worden. Abgesehen davon, daß ein solches Verfahren, das sich auf keine der mathematischen Begründungen stützt, nicht überall anwendbar ist (z. B. bei nicht Vorhandensein paralleler Flächen), ist es außerdem nicht eindeutig. Es kann nachgewiesen werden, daß bereits bei einem Sechskantprofil achtzehn verschiedene Schnittgeraden der möglichen Flächenkombinationen vorhanden sind. Nach der Lehre des Verfahrens sind, je nach der Wahl der Verlegung der gemittelten Ebenen (Schwerpunkt der Meßpunkte oder der Flächen), noch weitere achtzehn Achsen möglich. Jedoch ist keine dieser Achsen die richtige. Die auf diese Weise ermittelte ganzheitliche Auswertung zeigt einen hundertfach größeren Kontrollwert (z. B. integrale Summe der Abstandquadrate) als den tatsächlich vorhandenen. Außerdem kann auf diese Weise ein Sechskant nur als ein Parallelepiped bestimmt werden.

Des weiteren gibt es noch einen Fall, bei dem man versucht, eine gemeinsame Achse eines zylindrischen Werkstücks zu ermitteln. In der Koordinatenmeßtechnik wird üblicherweise eine Vorantastung des Werkstücks in mehreren Kreisschnitten durchgeführt. Die Werkstücksachse wird fälschlicherweise als Regressionsgerade durch die Kreismittelpunkte definiert. Die Zylinderradien werden auf diese gemeinsame Achse verlegt. Das Verfahren ist zwar wiederholbar und eindeutig, jedoch mathematisch nicht begründet und nachweislich ungenau. Im übrigen setzt das Regressionsgerade-Verfahren die Bedingung voraus, daß eine Antastung aller Zylinderflächen in Kreisschnitten erfolgt.

Die Benützung aller erwähnten herkömmlichen Verfahren ist außerdem für die Verknüpfung einzelner Formflächen miteinander sehr umständlich und zeitraubend und erfordert dabei ein großes Fachwissen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Auswerteverfahren für die Geometrieprüfung von Körpern aus mehreren Formflächen zu finden, das zuverlässig, bedienungsfreundlich und einfach, wiederholbar und genau die Parameter der integralen Geometrie errechnen, außerdem die Toleranz- und u. U. Gewichtungsanforderungen einschließen kann und somit die unnötigen Ausschüsse des Werkstücks oder dessen unnötig enge Toleranzen vermeidet.

Die Auswirkung der theoretischen Beziehungen zwischen den Elementen auf die ganzheitliche Geometriequalität, auch ohne Einbindung der gestellten Toleranzen zwischen den Formelementen, verändert das Bild eines Werkstücks in dem Maß, daß auch fälschlicherweise als Ausschuß deklarierte Werkstücke unter der Anwendung der ganzheitlichen (integralen) Auswertung als gut nachgewiesen werden können.

Das integrale Auswerteverfahren beinhaltet folgende Zielfunktionen (Ausgleichsbedingungen):

- Integrale least-square-Zielfunktion
- Integrale Tschebyscheff-Zielfunktion

Die integrale least-square-Zielfunktion ist gebaut als die Summe eines Polynoms bestehend aus mehreren vereinzelt, sich ähnelnden least-square-Polynomgliedern (jedes für eine Fläche des Werkstücks mit den dazugehörigen Meßpunkten) und mit zusätzlich mehreren Verknüpfungsanforderungen zwischen den Elementen des Werkstücks, die in der integralen Zielfunktion durch den Lagrange'schen Koeffizienten (Nebenbedingungen) als auch mit den Gewichtungskoeffizienten gekoppelt sind, wobei jede der Verknüpfungsanforderungen die vorgeschriebenen Toleranz-Grenzwerte und zusätzlich die Bedingungen, z. B. in Form der Sinus-Funktion, beinhaltet, bei denen die Abweichung von der entsprechenden Verknüpfung zwischen zwei Elementen einen Wert kleiner bis gleich groß dem Toleranzwert erreicht und diesen Wert nie überschreiten kann.

Die integrale Tschebyscheff-Zielfunktion ist gebaut als ein Polynom bestehend aus mehreren vereinzelt, sich ähnelnden Tschebyscheff-Approximation-Polynomgliedern (jedes für eine Fläche des Werkstücks mit den dazugehörigen Meßpunkten) und mit zusätzlich mehreren Verknüpfungsanforderungen zwischen den Elementen des Werkstücks, die in der integralen Zielfunktion durch den Lagrange'schen Koeffizienten (Nebenbedingungen) als auch mit den Gewichtungskoeffizienten verbunden (gekoppelt) sind, wobei jede der Verknüpfungsanforderungen die vorgeschriebenen Toleranz-Grenzwerte und zusätzlich die Bedingungen, z. B. in Form der Sinus-Funktion, beinhaltet, bei denen die Abweichung von der entsprechenden Verknüpfung zwischen zwei Elementen einen Wert kleiner bis gleich groß dem Toleranzwert erreicht und diesen Wert nie überschreiten kann.

Die Bausteine des integralen Auswertverfahrens sind die neuartigen Auswerterroutinen nach der least-square- und nach der Tschebyscheff-Approximation, die aus einer Punktwolke völlig unbekannte, gesuchte Parameter eines Standardelements ohne Start- oder Sollwertparameter und ohne Vorantastung der Formfläche, automatisch, eindeutig und zuverlässig ermitteln.

Sollte für die Auswertung der integralen Geometrie des Werkstückes das integrale least-square-Verfahren direkt aus den Meßpunkten angewendet werden, sind dazu drei Verfahrensschritte erforderlich:

Im Schritt 1 werden die Näherungsparameter jedes Standardformelements des Werkstücks im 3-D-Raum (Ebene, Kugel, Zylinder, Kegel und Torus) mit speziellem least-square-Verfahren (mit den modifizierten Zielfunktionen) aus den Meßpunktkoordinaten ermittelt. In den modifizierten Zielfunktionen werden die Punktabstände zum jeweiligen Formelement gleich Null gesetzt, womit eine Linearisierung des ansonsten nichtlinearen Optimierungsproblems durch mehrstufige Parametersubstitutionen erleichtert wird. Die so ermittelten Lösungen sind eindeutig und entsprechen nahezu dem wahren globalen Optimum. (Sollte jedoch für die Auswertung der integralen Geometrie des Werkstückes das integrale least-square-Verfahren mit bekannten Startparametern aus den Meßpunkten angewendet werden, dann ist dieser Schritt nicht erforderlich.)

Im Schritt 2 wird die exakte Zielfunktion auf bekannte Weise in die taylorische Reihe entwickelt, wobei nur das lineare Reihenglied benutzt wird und als Startparameter die vorherigen Näherungslösungen genutzt werden. In dem bekannten Newton'schen Iterationsverfah-

ren werden die Parameter stets verbessert.

Das Verfahren wird abgebrochen, sobald alle Verbesserungen einen kleinen Wert (z. B.  $1E-15$ ) erreicht oder unterschritten haben.

Im Schritt 3 werden integrale (ganzheitliche) Parameter eines Werkstücks aus der integralen least-square-Zielfunktion ermittelt. Die integrale Zielfunktion wird in die taylorische Reihe entwickelt, wobei nur das lineare Reihenglied benutzt wird und als Startparameter die vorher ermittelten Parameter genutzt werden. In dem Newton'schen Iterationsverfahren werden die Parameter stets verbessert.

Das Iterationsverfahren soll vorteilhaft ohne stetiger Koordinatentransformation in dreidimensionalem Raum durchgeführt werden. Hier werden in jedem Iterationsschritt nur integrale Verbesserungen für alle Parameter in die Teilfunktionen mit den jeweiligen Meßpunktmenge eingesetzt. Somit tragen alle Meßpunkte eines Werkstücks zur Bildung jedes Parameters bei. Das Verfahren wird abgebrochen, sobald alle Verbesserungen einen kleinen Wert (z. B.  $1E-15$ ) erreicht oder unterschritten haben.

Sollte für die Auswertung der integralen Geometrie des Werkstückes das integrale Tschebyscheff-Verfahren angewendet werden, sind dazu vier Verfahrensschritte erforderlich:

Der erste und zweite Schritt entsprechen den Schritten 1 und 2 des least-square Verfahrens.

Im dritten Schritt werden zunächst die integralen (ganzheitlichen) Parameter eines Werkstücks aus der dazu entwickelten integralen least-square-Zielfunktion (wie oben unter Schritt 3 beschrieben) ermittelt. Diese integralen Parameter dienen als Startwerte für den nächsten Schritt.

Im vierten Schritt werden integrale (ganzheitliche) Parameter eines Werkstücks aus der integralen Tschebyscheff-Zielfunktion ermittelt. Die integrale Zielfunktion wird in der taylorischen Reihe entwickelt, wobei nur das lineare Reihenglied benutzt wird und als Startparameter die vorher ermittelten Parameter der integralen least-square-Auswertung genutzt werden. In dem Newton'schen Iterationsverfahren werden die Parameter stetig verbessert. Das Iterationsverfahren soll vorteilhaft ohne stetiger Koordinatentransformation in dreidimensionalem Raum durchgeführt werden. Hier werden in jedem Iterationsschritt nur integrale Verbesserungen für alle Parameter in die Teilfunktionen mit den jeweiligen Meßpunktmenge eingesetzt. Somit tragen alle Meßpunkte eines Werkstücks zur Bildung jedes Parameters bei. Das Verfahren wird abgebrochen, sobald alle Verbesserungen einen kleinen Wert (z. B.  $1E-15$ ) erreicht oder unterschritten haben.

In beiden Auswerteverfahren werden die Startwerte für die Verknüpfungsbedingungen aus technischen Zeichnungen des Werkstücks genutzt. Die Toleranzbedingungen müssen eingegeben werden, wobei die Toleranzstartwerte in den toleranzbehafteten Verknüpfungsparametern auf Null gesetzt werden.

Die hohe Flexibilität und Benutzungsfreundlichkeit des Verfahrens wird durch Vorauswahl der Werkstücks-Konfiguration (Menü-Auswahl) und des Sortierungsverfahrens ermöglicht. Dazu ist ein spezielles Verfahren (z. B. Programm-Baustein "Logical") geeignet, das mit Hilfe des logischen Abfragesystems und mathematischer Eigenschaften der Verknüpfungen für jedes Formelement aus der Punktwolke automatisch, zuverlässig und eindeutig das Finden und Auswerten des unbekannten Formelements ermöglicht.

In der integralen, ganzheitlichen Auswertung einer komplexen Werkstücksgeometrie ermöglichen diese Bausteine, nämlich das Sortierungsverfahren und Programm "Logical", weiterhin die notwendige Analyse der Meßpunkte, die Anordnung der Formelemente und den Aufbau von Startparametern.

Die Benutzung von integralen Auswerteverfahren ist somit auf nur zwei Schritte minimiert:

- Aufruf des Programms,
- Aufruf des Koordinatenfiles.

Alle andere Funktionen werden im Verfahren automatisch erledigt.

Das integrale Auswerteverfahren, das praktisch im Programmpaket GEOCOMP realisiert worden ist, berechnet genau die beste integrale Geometrie eines Werkstücks im 3D-Raum mit erforderlicher Ausnutzung aller Toleranzen (z. B. Abweichung von der Senkrechtheit, Parallelität, Koaxialität usw.) der vereinzelter Verknüpfungen. Das Verfahren verfolgt mathematisch eine klar definierte Zielfunktion.

Es werden sämtliche Parameter (Orts- und Richtungsvektoren sowie skalare Maßparameter) und zusätzlich Eckpunktkoordinaten, Winkel, usw., automatisch und unmittelbar nach der Messung ermittelt. Im erfindungsgemäßen Verfahren der Geometrieprüfung werden die Formelemente automatisch angeordnet, die Parameter von allen Formelementen des Werkstücks oder eines Werkstückteiles aus den Meßpunkten automatisch generiert und diese im dreidimensionalen Raum ohne ständige Koordinatentransformation so lange iteriert, bis die gewünschte Genauigkeit erreicht worden ist. Das Programmpaket GEOCOMP ist für die Bedienung weitgehend flexibel. Es genügt z. B. nur die Vorlage der Meßpunkte und das Anklicken (wahlweise Aufruf) des Untermenüs, ohne jegliche Information über Flächenart und -zuordnung oder Antastfolge der Flächen, wobei das Programm alle diese Aufgaben sowie die Feststellung der Anzahl der gleichartigen Geometrieelemente automatisch erledigt. Dazu ist kein Fachwissen erforderlich.

Im Programm GEOCOMP ist eine Vielzahl von Anwenderprogrammen vorhanden. Folgende Auswahl der Werkstücksgruppen ist zur Zeit vorhanden:

- Zylinderblock, bzw. zylindrischer Körper mit einem oder bis zu acht parallelen Zylinderflächen mit keiner, einer oder zwei senkrechten oder geneigten Ebenen mit oder ohne Neigungstoleranz. Der Neigungswinkel und der maximale Wert der Neigungstoleranz muß angegeben (eingelesen) werden. Die Anzahl der Zylinder und Ebenen wird vom Programm automatisch erkannt und das Rechenverfahren selbst eingestellt;
- Abgesetzte Welle bzw. zylindrischer Körper mit einem oder bis zu acht koaxialen Zylinderflächen mit keiner, einer oder zwei senkrechten oder geneigten Ebenen mit oder ohne Neigungstoleranz. Der Neigungswinkel und der maximale Wert der Neigungstoleranz muß angegeben (eingelesen) werden. Die Anzahl der Zylinder und Ebenen wird vom Programm automatisch erkannt und das Rechenverfahren selbst eingestellt;
- Zylindrischer Körper mit zentrischem torusförmigem Einstich;
- Zylindrischer Körper mit einer oder zwei Abflachungen, von der Achse symmetrisch oder unsym-

metrisch angeordnet;

- Körper mit koaxialer zylindrischer und sphärischer Fläche;
- Körper mit koaxialer zylindrischer und sphärischer Fläche mit dem tangentialen Übergang einer Zylinderfläche in eine Kugelfläche;
- Körper mit koaxialer kegelförmiger und sphärischer Fläche mit dem tangentialen Übergang einer Kegelfläche in eine Kugelfläche;
- Quader (6-seitiger Quader);
- Würfel (6-seitiger Würfel);
- Sechskantprisma mit nur parallelen Seiten;
- Sechskantprisma mit parallelen Seiten und gleichen Winkeln zwischen den Seiten;
- Sechskantprisma mit parallelen Seiten, gleichen Winkeln zwischen den Seiten und gleichen Dicken;
- Gleichseitiges Sechskantprisma;
- Körper mit einer bis acht sphärischen Flächen. Die Anzahl der sphärischen Flächen wird vom Programm automatisch erkannt und das Rechenverfahren selbst eingestellt;

Durch die Anwendung des GEOCOMP Programmes ist die Vorantastung des Werkstücks nicht erforderlich. Insbesondere wird die Antastung bei den Koordinaten-Meßmaschinen vereinfacht und verkürzt.

Sowohl die Anzahl und die Art der geometrischen Elemente als auch die Anzahl der zugehörigen Meßpunkte für jedes Element wird automatisch eingestellt. Die Benutzung vom Geometrie-Auswerteprogrammpaket GEOCOMP ist auf nur zwei Schritte minimiert:

- Aufruf des Programms,
- Aufruf des Koordinatenfiles.

In einer einfachen Ausführung des Verfahrens für die Geometrieprüfung von Werkstücken mit mehreren Formflächen können die Startparameter in eine Datei eingelesen werden, wobei die Art der Erstellung der Startparameter belanglos ist. Um die Konvergenz des Iterationsverfahrens zu gewährleisten, sollten jedoch diese Startparameter nahe der Lösungsparameter liegen.

Die Meßpunkte können im karthesischen, sphärischen, zylindrischen oder anderem Koordinatensystem vorliegen.

Es zeigen die Figuren

Fig. 1 einen Auswertevergleich zwischen einem Hüllmantel des Tschebyscheff-Elements gemäß ISO-Norm 2692 (Maximum Material Prinzip);

Fig. 2 einen Zylinderblock mit vier parallelen Zylindern und einer senkrechten Ebene;

Fig. 3 einen Vergleich der Winkelabweichungen der Zylinderachsen zur Ebene bei Benutzung der konventionellen und integralen Auswertung aus dem gezeigten Beispiel in Fig. 2;

Fig. 4 einen Vergleich der Abweichungen der Rundheit und Ebenheit bei Benutzung der konventionellen und integralen Auswertung aus dem gezeigten Beispiel in Fig. 2;

Fig. 5 den tangentialen Übergang einer Kegelfläche in eine Kugelfläche bei Benutzung des integralen und konventionellen Auswerteverfahrens;

Fig. 6 einen zentrischen, torusförmigen Einstich im Zylinder bei Benutzung des integralen Auswerteverfahrens;

Fig. 7 einen Zylinder mit zwei parallelen äquidistanten Abflachungen bei Benutzung des integralen Aus-

werteverfahrens;

Fig. 8a die konventionelle (partielle) Auswertung des Sechskantprismas;

Fig. 8b die integrale Auswertung des Sechskantprismas als Parallelopiped;

Fig. 8c die integrale Auswertung des Sechskant-Parallelopipeds mit gleichen Winkeln;

Fig. 8d die integrale Auswertung des Sechskant-Parallelopipeds mit gleichen Winkeln und Dicken;

Fig. 8e die integrale Auswertung des gleichseitigen Sechskants;

Fig. 9 die konventionelle (partielle) Auswertung eines Quaders;

Fig. 10a die integrale Auswertung eines Quaders aus den gleichen Meßpunkten;

Fig. 10b die integrale Auswertung eines Würfels aus den gleichen Meßpunkten;

Fig. 11 ein integrales Spiegelsystem aus 5 kugelförmigen Spiegeln;

Fig. 12 eine Kurbelwelle bei Benutzung des integralen Auswerteverfahrens;

Fig. 13 den Vergleich zwischen der Tschebyscheff-Einpassung und integraler Auswertung am Beispiel eines Vierecks.

In der Fig. 1 wird ein Vergleich der Auswertung des Hüllmantels eines präzisen Werkstücks mit zwei konzentrisch angeordneten Zylinderflächen mit der strengsten Anwendung der DIN-ISO Norm 2692 (Maximum-Material-Prinzip) und die separate Tschebyscheff-Auswertung der beiden Zylinderflächen einerseits und der ganzheitlichen (integralen) Auswertung des Werkstücks andererseits, gezeigt. Mit den gleichen Meßpunktkoordinaten 1 wurde ein Tschebyscheff-Element 2 ermittelt. Die Zylinderachse 3 dieses Elements steht zur Referenzachse 4 um Winkel  $w$  geneigt. Gemäß DIN-ISO 2692 wurde der Hüllmantel 6 ermittelt. Mit Benutzung des integralen Auswerteverfahrens wurde der Hüllmantel 7 mit viel kleinerem Durchmesser ermittelt. Es wurde weiterhin eine andere integrale Zylinderachse 4a des Werkstücks 8 und ein anderer Durchmesser für den Referenzzylinder 5a gefunden. Das herkömmliche Verfahren führt bei einem realen Beispiel zu einem MMC-Wert (Hüllmanteldicke) von 0.3 mm. Die ganzheitliche (integrale) Auswertung des Werkstücks mit den gleichen Meßpunktkoordinaten, selbst bei der Anwendung des Integralverfahrens nach Gauß, führt nachweisbar und leicht nachprüfbar zu einem kleineren MMC-Wert von 0.1 mm. Wenn man anstelle des integralen Gaußverfahrens ein integrales Tschebyscheff-Verfahren anwendet, ist der MMC-Wert noch geringer und beträgt nur 0.08 mm.

Versucht man mit den herkömmlichen Methoden eine gemeinsame Achse von mehreren coaxialen Zylindern zu ermitteln, kann man zwischen zwei Verfahren wählen: Mittelwertverfahren der Richtungs cosine und das Regressionsgerade-Verfahren (Gerade durch Kreismittelpunkte). Das Mittelwertverfahren liefert viel schlechtere Ergebnisse als das Regressionsgerade-Verfahren. Beide Verfahren verfolgen keine Zielfunktion und liefern nur eine Näherungslösung. Dagegen wird mit dem Iterationsverfahren aus allen Meßpunkten gleichzeitig eine integrale Zylinderachse mit den zugehörigen Segmentradien ermittelt.

Die Fig. 2 zeigt einen Zylinderblock mit vier parallelen Zylindern 11, 12, 13 und 14 und einer senkrechten Ebene 10.

Das Problem taucht auf, wenn beispielsweise nur drei von vier parallelen Zylindern im Toleranzbereich stehen

und die tolerierte Rundheit noch nicht völlig ausgeschöpft ist. Das Werkstück wird normalerweise als Ausschuß bewertet. Durch die Verengung der Fertigungstoleranzen der folgenden Werkstücke wird man versuchen, die Parallelität von allen vier Zylinderachsen in Toleranzgrenzen zu halten.

Dagegen werden in neuem Iterationsverfahren aus allen Meßpunkten vier parallele Zylinderachsen gleichzeitig mit den zugehörigen Zylinderradien ermittelt. Sollte die Rundheit jedes Zylinders größer als die Toleranz sein, dann kann eine weitere Programmvariante gewählt werden. Es wird dann die Parallelitätstoleranz in der Achsneigung jedes Zylinders ausgeschöpft und eine kleinere Rundheit ermittelt. Erst dann, wenn bei der vollen Toleranzausschöpfung die Rundheit unzulässig ist, muß das Werkstück als Ausschuß bewertet werden.

Ein Problem taucht ebenfalls auf, wenn sich beispielsweise der Neigungswinkel einer Ebene zu einer Zylinderfläche außerhalb des Toleranzbereichs befindet und die tolerierte Rundheit und Ebenheit noch nicht völlig ausgeschöpft sind.

Das Werkstück wird mit dem konventionellen Auswerteverfahren ähnlich wie im vorherigen Fall als Ausschuß bewertet.

In einem Iterationsverfahren dagegen wird das Werkstück aus allen Meßpunkten als integrale Einheit ausgewertet. Die Neigungstoleranz wird als oberste Grenze angegeben.

Die integrale Auswertung bewirkt, daß auf Kosten der Rundheit und Ebenheit die Neigung in der Toleranzgrenze gehalten wird. Erst dann, wenn bei der vollen Ausschöpfung von Neigungstoleranz die Rundheit oder Ebenheit unzulässig groß sind, muß das Werkstück als Ausschuß bewertet werden.

Fig. 3 zeigt einen Vergleich der Winkelabweichungen der Zylinderachsen zur Ebene bei Benutzung der konventionellen und integralen Auswertung aus dem gezeigten Beispiel in Fig. 2, und die Fig. 4 zeigt einen Vergleich der Abweichungen der Rundheit von Zylindern 11 bis 14 und die Ebenheit der Ebene 10 aus dem gleichen Beispiel. Auf der vertikalen Skala A des Diagramms in der Fig. 3 sind die Werte der Winkelabweichungen in Milligrad eingetragen. Auf der Abszisse des gleichen Diagramms sind nebeneinander die Zylinder 11 bis 14, die sowohl mit dem konventionellen Auswerteverfahren (markiert mit 11a bis 14a) als auch mit dem integralen Auswerteverfahren (markiert mit 11b bis 14b) ausgewertet worden sind, dargestellt. Beim konventionellen Verfahren liegt die Neigung der Ebene 10 zu den zylindrischen Flächen 13 und 14 außerhalb des tolerierten Bereiches 15. Bei Benutzung der integralen Methode liegt die Winkelnähe jedes Zylinders innerhalb der Toleranzgrenze 15.

Auf der vertikalen Skala F des Diagramms in der Fig. 4 sind die Werte der Rundheit und Ebenheit in Mikrometern eingetragen. Auf der Ordinatenachse des gleichen Diagramms sind nebeneinander Zylinder, die mit dem konventionellen Auswerteverfahren (markiert mit 11c bis 14c) sowie mit dem integralen Auswerteverfahren (markiert mit 11d bis 14d) ausgewertet worden sind, dargestellt. Bei dem konventionellen und integralen Auswerteverfahren liegen sowohl die Rundheit als auch die Ebenheit innerhalb der Toleranzgrenze 16. Die integrale Auswertung bewirkt, daß auf Kosten der Rundheit und Ebenheit F (die größer geworden sind) die Neigungswinkel A der Ebene zu den Zylinderachsen in der Toleranzgrenze gehalten werden.

Fig. 5 zeigt einen tangentialen Übergang einer Kegel-

fläche in eine Kugelfläche. Der Kegel 31 mit der Achse 32 und die Kugel 33 sind nach dem herkömmlichen (partiellen) Verfahren ausgewertet. Mit Hilfe der integralen Auswertung des tangentialen Übergangs einer Kugelfläche in eine Kegelfläche wird ein anderer Kegel 34 mit der Kegellachse 35 und Kegelspitze 36 sowie eine neue Kugel 37 ermittelt. Mit dem neuen Auswerteverfahren kann also ein einwandfreier tangentialer Übergang zwischen einer Kegelfläche und Kugelfläche ermittelt werden, während ein solches Verfahren bei den herkömmlichen Methoden nicht bekannt ist.

Aus allen Meßpunkten werden in einem Iterationsverfahren neue, integrale, räumliche Geometrieparameter (Kegelspitze 36, Kegelöffnungswinkel, Kegellachse 35, Kugelmittelpunkt und Kugelradius) ermittelt.

Fig. 6 zeigt einen zentrischen, torusförmigen Einstich 41 im Zylinder 42. Wenn der Mittelpunkt des Torus auf der Zylinderachse liegt, ist der Einstich zentrisch. R ist der Zylinderradius, während rk für den kleinen und rg für den großen Torusradius steht.

Fig. 7 zeigt einen Zylinder 51 mit zwei parallelen äquidistanten Abflachungen 52 und 53. Bei Benutzung des neuen Auswerteverfahrens kann ein einfacher Körper mit zwei parallelen äquidistanten Abflachungen (Segment a auf jeder Seite gleich groß) oder nicht äquidistanten Abflachungen (Dicke h nicht zentrisch), mit oder ohne Parallelitätstoleranz, leicht ausgewertet werden.

Fig. 8a zeigt die konventionelle (partielle) Auswertung der Ebenen s1 bis s6. Das Problem, das behandelt wird, ist die Auswertung eines prismatischen Teils. Dabei stellt sich oft die Frage, ob man eine eindeutige Werkstücksachse findet, ob die Verknüpfungsmethode korrekt, übertragbar und überschaubar ist. Mathematisch ausgedrückt, verfolgt das übliche Verfahren keine Zielfunktion. Abgesehen davon, daß es schwierig und oft unübersichtlich ist, ist es kaum übertragbar oder wiederholbar und nicht eindeutig. Bei Benutzung des konventionellen Verfahrens kann z. B. das Sechskantprisma durch Mittelwertrechnung nur als Parallelopiped (Fig. 8b) ermittelt werden.

Mit dem neuen Integralverfahren kann jedes prismatische Teil (z. B. Quader, Würfel, Sechskant usw.) ausgewertet werden. Beim Sechskantprisma kann jede Querschnittsform ermittelt werden: Parallelopiped (Fig. 8b), Querschnitt parallel und gleichwinklig (Fig. 8c), Querschnitt parallel, gleichwinklig und gleich dick (Fig. 8d) oder ein gleichseitiges Sechseck (Fig. 8e). Zusätzlich zu diesen "O"-Formen sind noch weitere nichtgezeigte "X"-Formen des Sechskants ermittelbar. Es wird eine integrale Achse ermittelt, wobei sämtliche theoretische Verknüpfungen automatisch erfüllt sind. Man erhält die Seitendicke, Seitenbreite, Eckpunktkoordinaten, Punktabweichungen innerhalb und außerhalb des Prismas usw. Bei der unzulässig großen Ebenheit irgendeiner Fläche kann eine Programmvariante mit der Winkel-Toleranzausschöpfung eingesetzt werden.

Fig. 9 zeigt die konventionelle partielle Auswertung eines Werkstücks 61, das die Form eines Quaders erhalten soll. Mit der herkömmlichen Mittelwertrechnung kann nur ein Viereck-Parallelopiped 62 und eine gemeinsame Achse (Vektor  $\hat{n}$ ) ermittelt werden.

Fig. 10a zeigt die integrale Auswertung eines Quaders aus den gleichen, nichtgezeigten Meßpunkten mit der gemeinsamen Achse  $\hat{n}$  und den Quaderseiten a, b, c, die untereinander rechtwinklig sind. Es können die Prismorientierung im 3D-Raum, Dicke und Weite der Seiten, Eckpunktkoordinaten und die Punktabweichungen

innerhalb und außerhalb des Prismas ermittelt werden.

Fig. 10b zeigt die integrale Auswertung eines Würfels mit der Seite h und dem Mittelpunkt M, aus den gleichen Meßpunkten wie in der Fig. 9 und Fig. 10a. Wie in vorheriger Fig. 10a, können außer des Mittelpunktes M noch die Würfel-Orientierung im 3D-Raum, Seite h, Eckpunktkoordinaten und die Punktabweichungen innerhalb und außerhalb des Würfels ermittelt werden.

Fig. 11 zeigt ein integrales Spiegelsystem aus 5 kugelförmigen Spiegeln 71 bis 75. Das bestehende Problem dabei ist, wie man den besten Mittelpunkt von zwei oder mehreren Kugelsegmenten (sphärischen Reflektoren) ermitteln kann. Bei der herkömmlichen Auswertung wird eine Mittelwertrechnung eingesetzt. Die Ergebnisse sind sehr schlecht und die wahre Qualität des Werkstücks bleibt unbekannt. Im neuen Iterationsverfahren werden der integrale Mittelpunkt und die neuen Segmentenradien aus allen Meßpunkten ermittelt.

Fig. 12 zeigt eine Kurbelwelle. Mit dem integralen Auswerteverfahren können die zylindrischen Flächen (Lager) Z1 bis Z4 und La bis Le, die senkrecht zur Ebene (Flansch) E1 stehen, im 3D-Raum mit freier Orientierung der Kurbelwelle, mit der Ausnutzung der Verknüpfungstoleranzen, ganzheitlich ausgewertet werden.

Fig. 13 zeigt den Unterschied zwischen der Tschebyscheff-Einpassung einer ganzheitlichen Geometrie (eines Soll-Vierecks) 121 in die Meßpunkte 122 mit der ganzheitlichen Auswertung eines Vierecks 123. Die Achse 124 des eingepaßten Vierecks 121 hat eine andere Lage als die Achse 125 des ausgewerteten Vierecks 122. Es kann nachgewiesen werden, daß die korrekte Einpassung der ganzheitlichen Geometrie nur durch die vorherige integrale Auswertung durchgeführt werden kann.

Literaturhinweise:

- [1] DIN-ISO 2692 Technische Zeichnungen Form- und Lagetolerierung Maximum-Material-Prinzip, Mai 1990
- [2] DIN-ISO 5459 Technische Zeichnungen Form- und Lagetolerierung, Januar 1982.

#### Patentansprüche

1. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werkstücks mit mehreren Formflächen mit freien Ausrichtungen in dreidimensionalem Raum aus Meßpunkten, die in karthesischem, sphärischem, zylindrischem oder einem anderen Koordinatensystem dargestellt sind, und die Meßpunktezahlgroßer als die Anzahl der zu berechnenden Parameter ist, wobei die theoretischen Beziehungen (Verknüpfungen) der einzelnen Formelemente berücksichtigt werden, dadurch gekennzeichnet, daß die Zielfunktion entweder als Minimum einer integralen (ganzheitlichen) Summe der Quadrate der Meßpunktabstände von der jeweiligen Formfläche des Werkstücks oder als integrales ganzheitliches Minimum der betragsmaximalen Meßpunktabstände von der jeweiligen Formfläche des Werkstücks definiert ist, wobei sämtliche tolerierte Verknüpfungen zwischen den Formflächen und Gewichtungen der einzelnen Formflächen eingeschlossen werden.
2. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werkstücks mit mehreren Formflächen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Parameter eines Werkstücks unter Berücksichtigung der kleineren bis gleichgroßen angeforderten Toleranz für die jeweilige Formfläche und für die Verknüpfungen zwischen den Formflächen, ermittelbar sind.
3. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werk-

stücks mit mehreren Formflächen nach Anspruch 1 und Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das iterative Finden der Werkstücksparmater ohne stetiger Koordinatentransformation in dreidimensionalem Raum erfolgt.

4. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werkstücks mit mehreren Formflächen nach Anspruch 1 und einem der folgenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, daß keine Vorantastung der einzelnen Formelemente auf der Koordinatenmeßmaschine und keine anderen Startparameter zwecks Erstellung der Näherungsparameter des jeweiligen Formelements oder zum Ausrichten des Formelements bzw. des gesamten Werkstücks erforderlich sind.

5. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werkstücks mit mehreren Formflächen nach Anspruch 1 oder einem der folgenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Reihenfolge der Antastung und die Antastungsart der einzelnen Werkstücks-Formflächen zum Programmablauf belanglos sind.

6. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werkstücks mit mehreren Formflächen nach Anspruch 1 und einem der folgenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein prismatischer Körper in Form des theoretischen Quaders, Würfels, Sechskants usw. aus sechs und u. U. mehreren Ebenen mit oder ohne Toleranzanforderungen ganzheitlich samt Ebenenrichtungen, Werkstücksachse, Eckpunktkoordinaten, Diagonalen, Seitendicken, Seitenbreiten usw. integral ermittelbar ist.

7. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werkstücks mit mehreren Formflächen nach Anspruch 1 und einem der folgenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Werkstück in Form einer abgesetzten Welle, eines Zylinderblocks oder einer Kurbelwelle bestehend aus mehreren coaxialen oder parallelen oder senkrechten Zylinderflächen und entweder mit keiner, einer oder mehreren zu den Zylinderachsen senkrecht oder parallel stehenden Ebenen mit oder ohne Toleranzanforderungen ganzheitlich ermittelbar ist.

8. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werkstücks mit mehreren Formflächen nach Anspruch 1 und einem der folgenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Kugel- bzw. Spiegelsystem mit mehreren konzentrischen axialen Kugel- bzw. Spiegelflächen mit oder ohne Toleranzanforderungen ganzheitlich ermittelbar ist.

9. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werkstücks mit mehreren Formflächen nach Anspruch 1 und einem der folgenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Werkstück mit einer oder mehreren coaxialen Kegel- oder Zylinderflächen und mindestens einer Kugelfläche mit nahtlosem zentrischem Übergang mit oder ohne Toleranzanforderungen ganzheitlich ermittelbar ist.

10. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werkstücks mit mehreren Formflächen nach Anspruch 1 und einem der folgenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Werkstück mit einer oder mehreren coaxialen Kegel- oder Zylinderflächen und mindestens einer einseitigen oder beidseitigen parallelen Abflachung mit oder ohne Toleranzanforderungen ganzheitlich ermittelbar ist.

11. Verfahren für die Geometrieprüfung eines Werkstücks mit mehreren Formflächen nach Anspruch 1 und einem der folgenden Ansprüche, da-

durch gekennzeichnet, daß ein Werkstück mit einer oder mehreren coaxialen Kegel- oder Zylinderflächen und mindestens einem konzentrischen, torusförmigen Einstich mit oder ohne Toleranzanforderungen ganzheitlich ermittelbar ist.

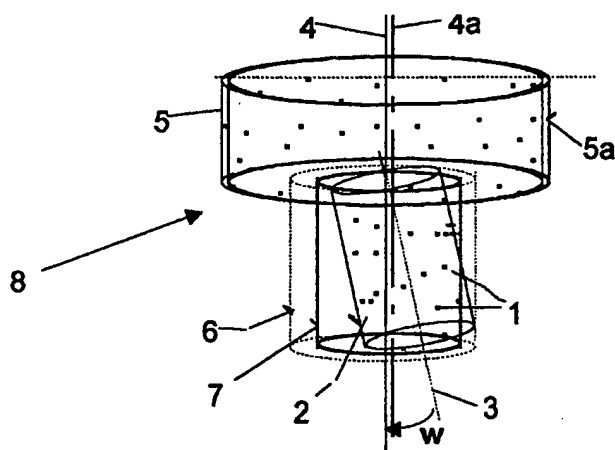
---

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

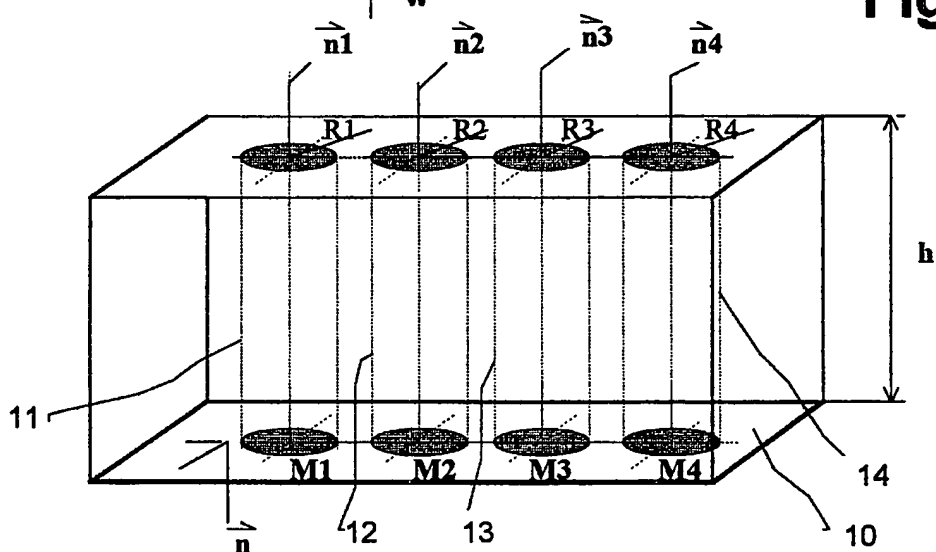
---

- Leerseite -

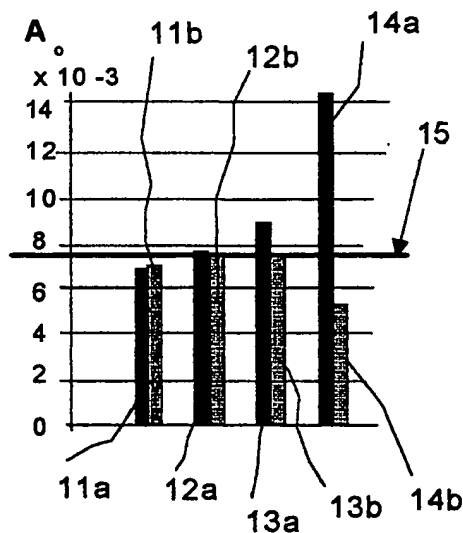




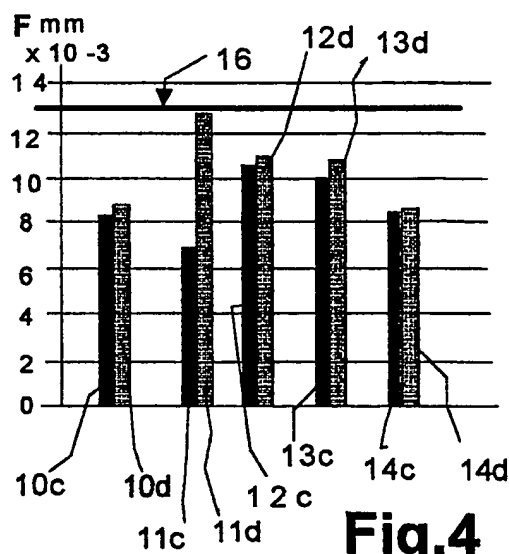
**Fig. 1**



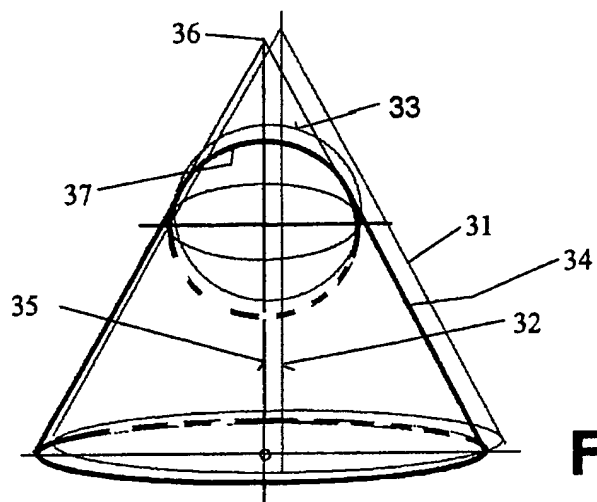
**Fig. 2**



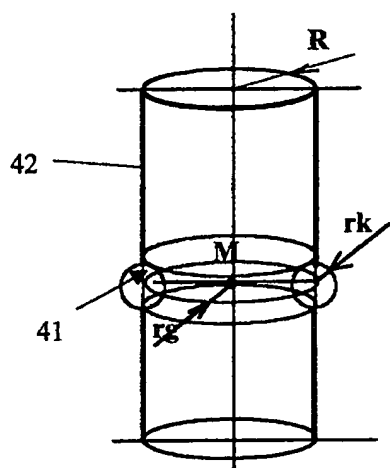
**Fig. 3**



**Fig. 4**

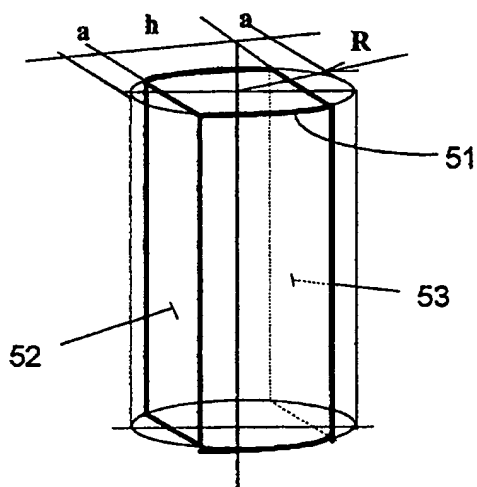


**Fig. 5**

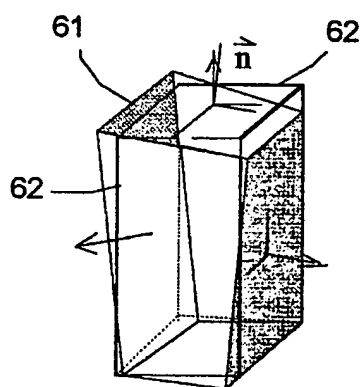
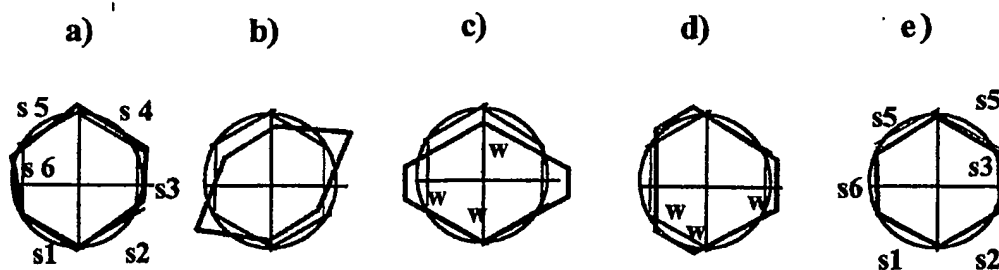


**Fig. 6**

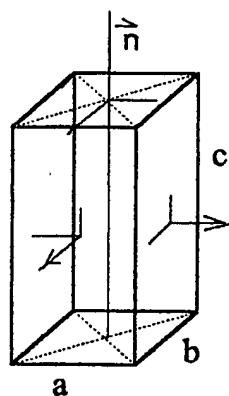
**Fig. 7**



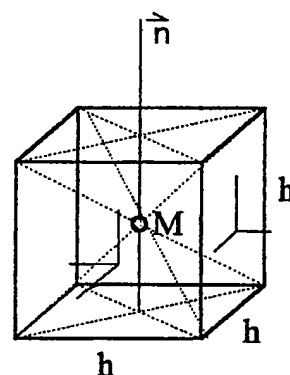
**Fig.8**



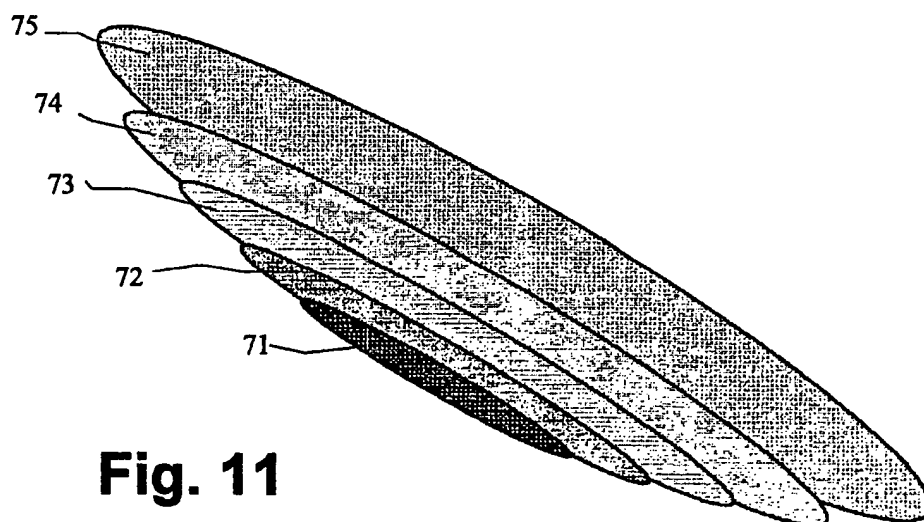
**Fig.9**



**Fig.10a**



**Fig. 10b**



**Fig. 11**

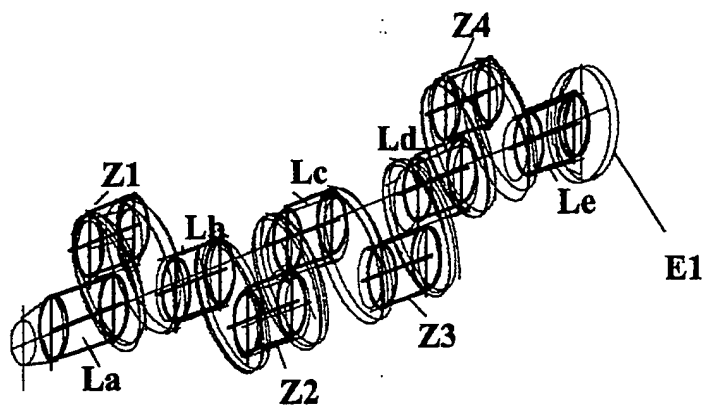


Fig. 12

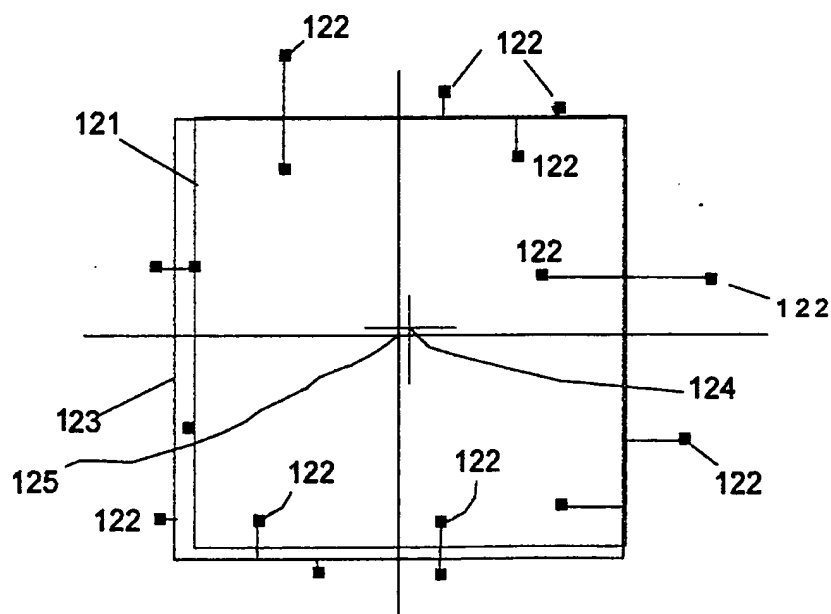


Fig.13

## Determining geometrical tolerances of multi-surface-form workpieces

**Patent number:** DE19600002  
**Publication date:** 1996-07-11  
**Inventor:** SANTIC BLAZ DR (DE)  
**Applicant:** SANTIC BLAZ DR UNIV ZAGREB (DE)  
**Classification:**  
- **international:** G01B21/04; G06T7/60; G07C3/14  
- **european:** G01B21/04; G06T7/60; G07C3/14  
**Application number:** DE19961000002 19960101  
**Priority number(s):** DE19961000002 19960101; DE19951000187 19950105

### Abstract of DE19600002

The geometric testing involves derivation of measurement points which are derived in any three dimensional coordinate system, the number of points being greater than the parameters to be measured. Allowance is made for the theoretical correlations between the individual surface forms. The objective function is defined either as the minimum of an integrated sum of the square of the distance of the measurement points from the particular surface-forms of the workpiece or as the integrated minimum of that square. All the tolerance correlations between surface-forms and the individual weightings of the individual forms are included.

---

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide